СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ




УДК 691.4;552.55

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-46-58

Технология и особенности производства крупноформатных керамических камней на основе опоковидных пород

В.Д. Котляр ✉, Ю.В. Терёхина , К.А. Лапунова


Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ diatomit_kvd@mail.ru

Аннотация

Введение. Одной из актуальных задач производства стеновой керамики в настоящее время является производство крупноформатных керамических камней с прочностью при сжатии 10–15 МПа и теплопроводностью менее 0,12 Вт/(м·ºС), при этом рыночная стоимость за 1 м^3 должна быть конкурентоспособной по отношению к газобетонным блокам и находиться в пределах 5–6 тысяч рублей за 1 м^3. Решить эту задачу возможно за счет разработки современной энергоэффективной технологии производства и использования в качестве основного сырья опоковидных пород и отходов углеобогащения в качестве топлива и выгорающей добавки.

Материалы и методы. Для исследований использовались опоковидные породы — опоки месторождений юга России — Нагольновское, Баканское, Шахтинское, Авило-Федоровское, угольный кек производства ООО «Пирамида». Изучение химического и минерального состава проводилось стандартными методами на подготовленных образцах. Изучение керамических и технологических свойств (пластичность, формовочная влажность, степень измельчения, воздушная и огневая усадки, прочность при сжатии, водопоглощение) сырья проводилось по общепринятым методикам на предварительно измельченных до определенного зернового состава пробах, так как опоки, в зависимости от вида, не размокают или медленно размокают в воде.

Результаты исследования. Подтверждены дообжиговые технологические свойства опок и их отличия от традиционного размокаемого в воде глинистого сырья: повышенная формовочная влажность, небольшая воздушная усадка, малая чувствительность к сушке. Установлены зависимости плотности и прочности образцов от степени измельчения опок, температуры обжига и количества угольного кека в составе сырьевой смеси. Определено влияние отходов углеобогащения и их оптимальное количество на физико-механические свойства обожженных образцов. Ввод угольного кека позволяет исключить использование газа для обжига или минимизировать его ввод. На основе полученных результатов разработана упрощенная технологическая схема производства крупноформатных камней с минимальной себестоимостью.

Обсуждение и заключение. Предлагаемая технологическая схема состоит из двух единиц основного массоподготовительного оборудования, формование изделий осуществляется способом полужесткой экструзии, сушка изделий производится непосредственно на обжиговых вагонетках, а для обжига используется угольный кек, который вводится в состав сырьевой смеси. Указанные факторы и технологические приемы позволяют получать изделия с низкой теплопроводностью, но с прочностью в 3–5 раз выше, чем у газобетонных блоков аналогичной плотности. Себестоимость керамических камней составит 3–3,5 тысячи рублей за 1 м^3 изделий. Ростовская область, обладающая запасами опоковидных пород и невостребованными запасами техногенного угольного сырья, может стать центром производства крупноформатных керамических камней с низкой стоимостью и обеспечить юг и центральную часть страны высококачественными стеновыми материалами.

Ключевые слова: технология, опоки, керамический камень, выгорающие добавки, водопоглощение, пористость, прочность, теплопроводность, формование, обжиг

Для цитирования. Котляр В.Д., Терёхина Ю.В., Лапунова К.А. Технология и особенности производства крупноформатных керамических камней на основе опоковидных пород. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):46–58. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-46-58

Original article

Technology and Specifics of the Large-Sized Ceramic Stones Manufacture from the Opoka Rocks

Vladimir D. Kotlyar ✉, **Yuliya V. Terekhina**, **Kira A. Lapunova**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ diatomit_kvd@mail.ru

Abstract

Introduction. At present one of the pressing issues of the wall ceramics production is manufacturing the large-sized ceramic stones with compressive strength of 10–15 MPa, thermal conductivity less than 0.12 W/(m ·°C) and market price of 5000–6000 rubbles per 1 m^3, which would be able to compete with the foam concrete blocks. This task can be solved by developing a modern energy-efficient technology of production and using the opoka rocks as the main raw material and the by-products of coal benefication as the fuel-burning additive.

Materials and Methods. The opoka rocks of the southern Russia deposits Nagolnovskoye, Bakanskoye, Shakhtinskoye, Avilo-Fyodorovskoye and the coal slurry produced at the Pyramida LLC were used for the research. The study of the chemical and mineral composition was carried out on the prepared specimens using the standard methods. The study of the ceramic and technological properties of raw material (plasticity, molding water content, degree of fineness, air and firing shrinkage, compressive strength, water absorption) was carried out according to the common methodology, using the test specimens preground to a certain grain-size composition. This was required because, depending on the opoka type, it might not swell or swell slowly on wetting.

Results. Pre-firing technological properties of the opoka rocks and their differences from the traditional, swelling on wetting, clay raw materials were confirmed: increased molding water content, small air shrinkage, low sensitivity to drying. The dependence of the specimens' density and strength on opoka degree of fineness, firing temperature and the amount of coal slurry in the raw-material mixture has been established. The optimal amount and influence of the coal benefication by-products on the physical and mechanical properties of the firing specimens have been determined. Adding the coal slurry has made it possible to exclude or minimize the use of gas for firing. On the basis of the obtained results a simplified process flow chart for the minimal prime cost manufacture of the large-sized stones has been developed.

Discussion and Conclusion. The proposed process flow chart comprises two basic units of mixture preparing equipment, the molding of products is carried out by semi-solid extrusion, the drying of products is carried out directly in kiln cars, whereas the coal slurry added into the raw mixture is used for firing. These factors and technological methods allow getting the products with the low thermal conductivity, but with the strength 3–5 times higher than that of the similar density foam concrete blocks. The ceramic stones prime cost will amount to 3000–3500 rubbles per 1 m^3 of products. The deposits of the opoka rocks and stock of the unused technogenic coal raw material available in Rostov region can make it a centre of the low cost large-sized ceramic stones manufacture and ensure supply of the high-quality wall materials to the southern and central parts of the country.

Keywords: technology, opoka rocks, ceramic stone, burning additives, water absorption, porosity, strength, thermal conductivity, molding, firing.

For citation. Kotlyar VD, Terekhina YuV, Lapunova , KA. Technology and Specifics of the Large-Sized Ceramic Stones Manufacture from the Opoka Rocks. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):46–58. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-45-58

Введение. Крупноформатные керамические камни с номинальной толщиной более 140 мм и формата 6,9–14,9 НФ в нашей стране стали производить и применять в строительстве относительно недавно — последние 10–15 лет, хотя в Западной Европе и США их производство известно достаточно давно, а широкое применение началось с 80-х годов прошлого века [1–5]. Производимые в настоящее время крупноформатные керамические камни имеют относительно

низкую среднюю плотность – менее 800 кг/м^3, которая достигается за счет большой вертикальной пустотности изделий — 50–60 %, теплопроводность – менее 0,20 Вт/(м·°С), морозостойкость более 35 циклов, при этом прочность при сжатии составляет 10–12,5 МПа, что вполне достаточно для стеновых изделий. Указанные характеристики крупноформатных керамических камней позволяют использовать их как для ограждающих, так и для самонесущих и несущих конструкций. Основным конкурентом керамических камней на рынке стеновых материалов являются блоки из ячеистого бетона автоклавного твердения — газоблоки, объем производства которых в настоящее время существенно больше в сравнении с керамическими камнями. По данным за 2022 год объем производства керамических камней составляет около 10 млн. м^3, а объем производства газоблоков — около 15 млн. м^3 [6–7].

Основными конкурентными преимуществами блоков из автоклавного газобетона, в сравнении с керамоблоками, являются: меньшая плотность и теплопроводность в сухом состоянии, а также меньшая стоимость. Последний фактор является решающим в настоящее время в большинстве случаев при выборе строительных материалов, несмотря на то, что блоки из ячеистого газобетона обладают низкой прочностью, высокой сорбционной влажностью (для марок D500-800 до 18–22 %), усадкой, малой прочностью — 2,5–3,5 МПа. Низкая прочность блоков из газобетона позволяет использовать их только для одно- и двухэтажного строительства с устройством монолитных поясов или для ограждающих самонесущих стен при каркасном строительстве, при этом обязательным является усиление поверхностного слоя блоков путем нанесения прочных штукатурных растворов. Керамические камни имеют очень низкую гигроскопичную влажность, не обладают усадкой, им не опасно замокание, они обладают существенно большей прочностью, что позволяет возводить из них многоэтажные здания — до 10 этажей. Высокая морозостойкость позволяет использовать их как лицевые стеновые материалы без нанесения штукатурных растворов. Анализ конкурентных преимуществ газоблоков и керамоблоков позволил сформулировать основные задачи для производителей стеновой керамики для повышения востребованности продукции на рынке:

– снижение теплопроводности изделий до 0,10 Вт/(м·°С) при сохранении марки по прочности не ниже М100;

– снижение стоимости реализации изделий до 8–10 рублей за условную единицу в пересчете на объем стандартного кирпича (250 х 120 х 65 мм).

В настоящее время стоимость реализации керамических камней (блоков) Славянского кирпичного завода, единственного по выпуску данных изделий на юге России, составляет 130 рублей за блок формата 10,8НФ, что в пересчете на один кирпич стандартного размера составляет 12 рублей.

Для достижения поставленной задачи по успешной конкуренции с газоблоками и достижения высокой экономической эффективности производства, себестоимость керамоблоков должна составлять в пересчете на один условный кирпич до 5–6 рублей, т.е. затраты на производство 1 блока формата 10,8НФ не должны превышать 65 рублей. Данный параметр достижим при строительстве нового или реконструкции существующего завода с учетом следующих факторов:

– организация производства должна осуществляться на готовой производственной площадке с подведенными внешними сетями или на действующем кирпичном заводе с выработанным ресурсом посредством его реконструкции;

– сырьевые материалы должны иметь минимальную стоимость, гибкие технологические свойства и находиться в непосредственной близости от завода;

– технологическая схема производства должна быть упрощенной с минимальным количеством массоподготовительного оборудования, технологических переделов и укладкой сырцовых изделий сразу на обжиговые вагонетки для сушки и обжига;

– затраты на обжиг должны быть минимальные. Достичь этого можно без использования газа, с применением в качестве топливно-выгорающей добавки отходов углеобогащения и продуктов переработки террикоников Восточного Донбасса с определенными характеристиками.

Проведя многофакторный анализ, нами установлено, что решить задачу по организации производства керамических камней с минимальной себестоимостью возможно с использованием опал-кристобалитовых опоковидных пород, широко распространенных в Ростовской области и других регионах юга России. Тонкопористая камневидная структура пород и аморфный опаловый кремнезем, являющийся основной составляющей опал-кристобалитовых пород, а также полное выгорание угольной составляющей, обеспечивают существенное снижение теплопроводности керамики на их основе, а особые керамические дообжиговые и обжиговые свойства позволяют разработать эффективную технологическую линию с минимальными производственными затратами [8–12].

Материалы и методы. Основные методы исследования дообжиговых и обжиговых свойств опоковидных пород, используемые приборы и оборудование представлены на рис. 1.

Пробы опал-кристобалитовых опоковидных пород для проведения исследований отбирались на известных месторождениях юга России лично авторами данной публикации.



Рис. 1. Методы изучения опоковидных пород для производства на их основе крупноформатных керамических камней

Представительные лабораторно-технологические пробы формировались из точечных проб путем их объединения и квартования. Для изучения и подтверждения химико-минералогического состава и структурных особенностей опоковидных опал-кристобалитовых пород применялись общепринятые методики и современные методы исследований, которые проводились в центрах коллективного пользования Донского государственного технического университета и Южного федерального университета. Технологические исследования керамических свойств проводились на сырьевых смесях различного зернового состава по общепринятым в технологии керамики методикам испытаний.

Результаты исследования. Опоковидные породы отличаются большим разнообразием состава, в зависимости от которого выделяются различные литологические разновидности (таблица 1): от опок малоглинистых с максимальным содержанием аморфного кремнезема до опок высококарбонатных и смешанных глинисто-карбонатных пород.

Для производства изделий стеновой керамики наиболее пригодными являются опоки среднеглинистые и глинистые с содержанием карбонатной составляющей до 20 %. Общим для всех видов опок является камневидная структура, микропористость и то, что глинистые минералы, преимущественно гидрослюды, находятся в прочном контакте с опаловым кремнеземом (рис. 2) и, несмотря на достаточно высокое их содержание в естественном состоянии, не проявляют своих пластических свойств. Камневидная структура предопределяет, что помимо минерального состава и технологических факторов, на дообжиговые и обжиговые свойства данного сырья существенное влияние оказывает степень его измельчения. С увеличением степени измельчения возрастает пластичность формовочных масс, воздушная и огневая усадка, степень спекаемости, прочность обожженных образцов.

Причем, пластичность формовочных масс резко возрастает при преобладании в зерновом составе фракции менее 0,05 мм, что связано с «высвобождением» глинистых минералов от контакта с опалом.

Таблица 1

Классификация опоковидных пород по вещественному составу как сырья для стеновой керамики

Вид опоки	Содержание компонентов, % по массе		
	$SiO_{2\ общ.}$ $SiO_{2\ опал.}$	Глинистые минералы	Карбонатный компонент
Опока малоглинистая	75-90 60-70	10-20	до 5
Опока среднеглинистая	60-80 40-60	20-35	до 5
Опока глинистая (глина кремнистая)	45-65 35-45	35-50	до 5
Опока малоглинистая карбонатная	60-85 40-60	10-20	5-20
Опока карбонатная среднеглинистая	45-75 30-40	20-35	5-20
Опока карбонатная глинистая	30-60 20-30	35-50	5-20
Опока малоглинистая высококарбонатная	45-70 30-40	10-20	20-35
Опока среднеглинистая высококарбонатная	30-60 20-40	20-35	20-35
Смешанная опоковидно-высокарбонатно-глинистая порода	15-45 20-30	35-50	20-35

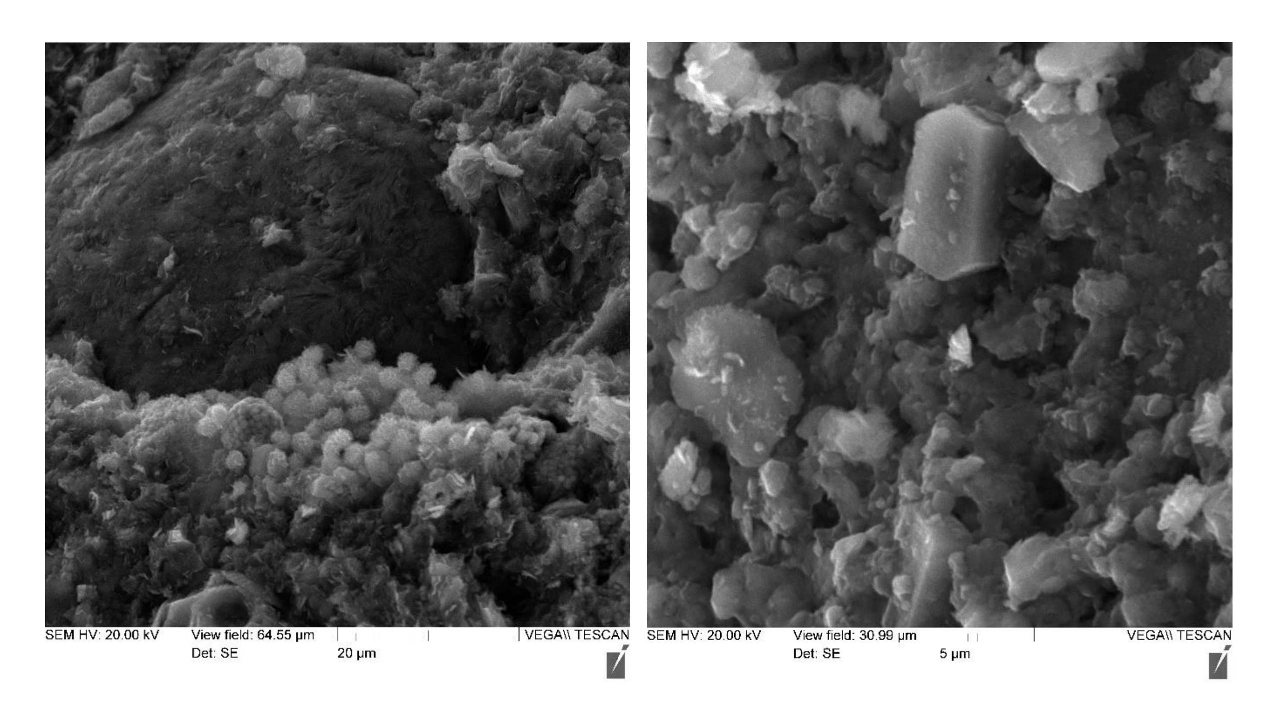


Рис. 2. Глинистые минералы в опоках листоватой и игольчатой формы в контакте с опаловым кремнеземом глобулярной формы (Шахтинское месторождение)

На рис. 3 и 4 для примера показаны зависимости плотности и прочности обожженных образцов на основе опок Шахтинского месторождения от зернового состава сырьевых масс и температуры обжига.

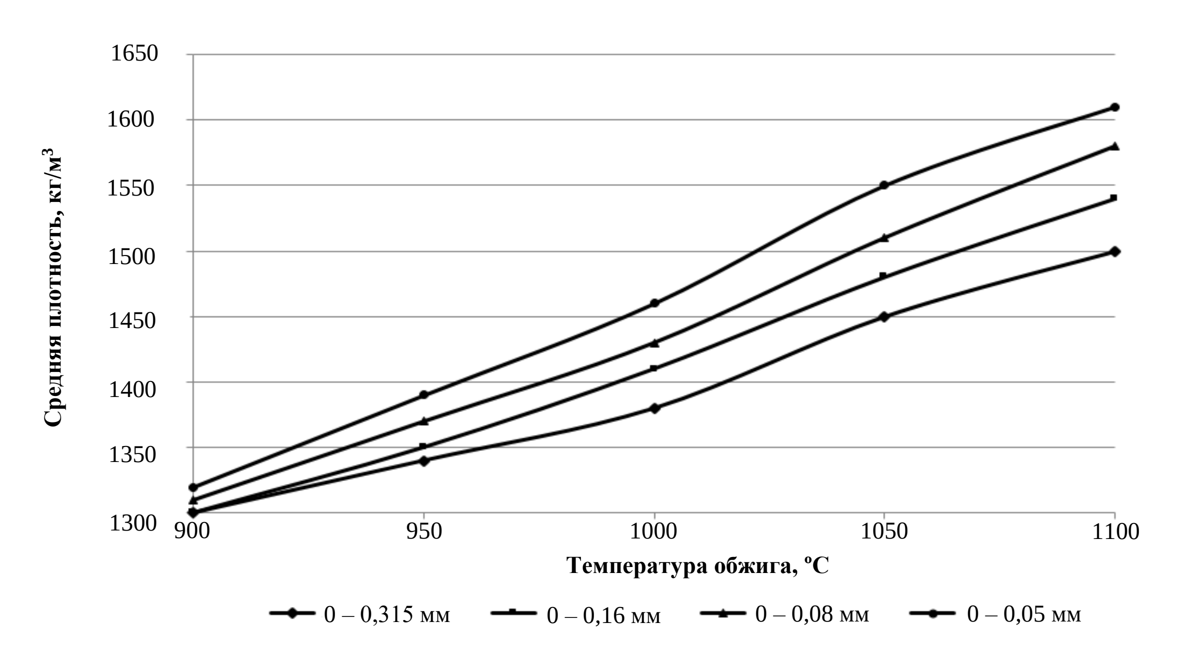


Рис. 3. Зависимость плотности обожженных образцов от зернового состава сырьевой смеси и температуры обжига

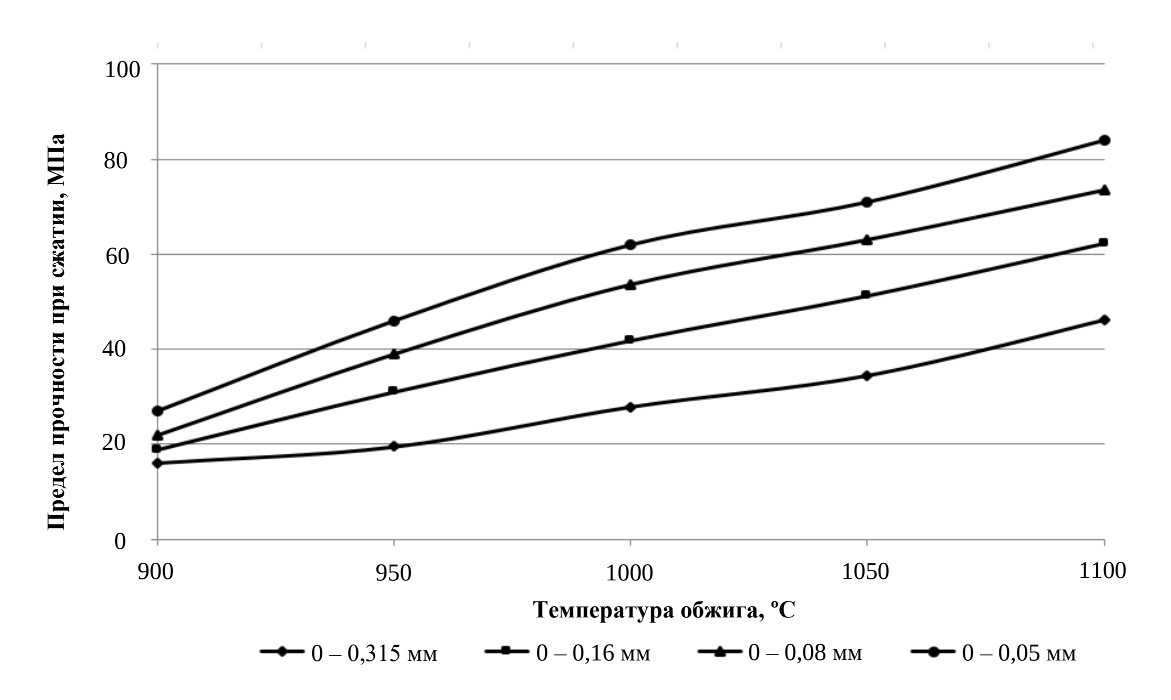


Рис. 4. Зависимость предела прочности при сжатии обожженных образцов от зернового состава сырьевой смеси и температуры обжига

Как видно из результатов экспериментов, обожженные образцы на основе опок обладают достаточной прочностью для стеновой керамики: от 27,9 до 62 МПа при температуре обжига 1000 °С и измельчении материала до фракций от 0–0,315 мм до 0–0,05 мм и от 34,5 до 71 МПа при температуре обжига 1050 °С и таком же измельчении. Особенностью обожженных образцов на основе опок является пониженная на 15–20 %, в сравнении с глинистым сырьем, плотность: от 1380 до 1460 кг/м^3 при температуре обжига 1000 °С и измельчении материала до фракций от 0–0,315 до 0–0,05 мм и от 1450 до 1560 1460 кг/м^3 при температуре обжига 1050 °С и таком же измельчении. Пониженная плотность керамики на основе опок объясняется частичным сохранением природной микропористости опок, что совместно с аморфной структурой опалового кремнезема приводит к существенному снижению теплопроводности материала.

Одним из существенных факторов снижения себестоимости производства изделий является снижение затрат на обжиг. Достичь этого можно, используя отходы углеобогащения и продукты переработки терриконов в качестве топливно-выгорающей добавки без использования природного газа или используя его в минимальном количестве только для поддержки горения. Результаты наших исследований и других авторов, проведенные ранее, показали, что наиболее целесообразным для этих целей является использование мелкофракционных материалов (например,

угольного кека) с преимущественным размером зерен от 0,5 до 2,0 мм, в которых содержание угольного компонента составляет 30–50 % [13–14]. Для полного обжига изделий стеновой керамики количество угля с калорийностью около 8000 ккал/кг должно составлять 8 % от массы изделий. Таким образом, количество угольного кека в составе сырьевой смеси должно быть 15–20 %. С экономической точки зрения использовать угольный кек для обжига керамического кирпича и камней очень привлекательно, так как при стоимости угольного кека 300 рублей за тонну, стоимость единицы выделяемого тепла при его горении на порядок ниже, в сравнении с газом и чистым углем. Однако ввод в состав сырьевой смеси угольного кека приводит к снижению плотности и прочности обожженного керамического материала, которая для получения крупноформатных керамических блоков с пустотностью около 50 % должна быть не ниже 30 МПа. Эксперименты, проводимые нами, показали, что ввод угольного кека с содержанием угля около 50 % в количестве до 15–20 % приводит к снижению плотности образцов примерно на 7–9 %, а прочности до 30 %.

На рис. 5 и 6 для примера показаны зависимости прочности и плотности образцов от количества вводимого угольного кека и зернового состава сырьевой смеси при температуре обжига 1050 °С и продолжительности обжига 22 часа. Следует отметить, что ввод угольного кека в количестве 15 % обеспечивает 90–95 % топлива, необходимого для обжига. При вводе 20 % угольного кека будет наблюдаться избыток тепла, которое можно отводить для сушки изделий.

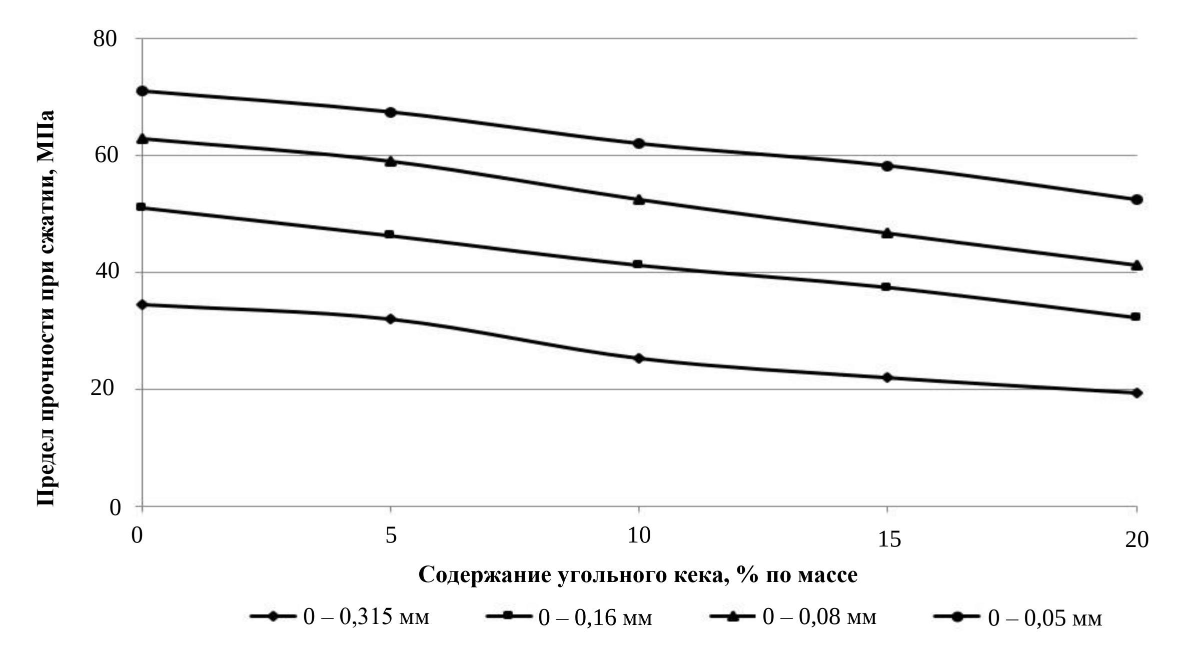


Рис. 5. Зависимость предела прочности при сжатии обожженных образцов от зернового состава сырьевой смеси и количества угольного кека

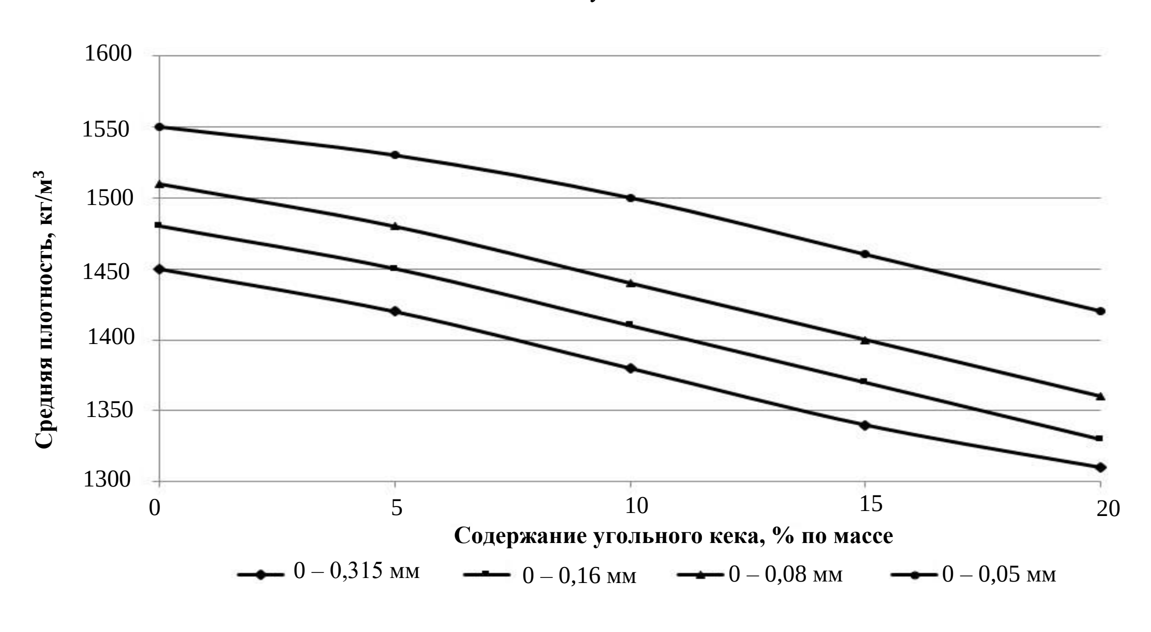


Рис. 6. Зависимость плотности обожженных образцов от зернового состава сырьевой смеси и количества угольного кека ($Т_{обж.}$ 1050 °С)

Как видно, необходимая прочность выше 30 МПа, при содержании угольного кека 15–20 % и температуре обжига 1050 °С, достигается только для зерновых составов 0–0,16 мм и тоньше. При этом плотность обожженных образцов составляет 1370–1420 кг/м^3. Более тонкое измельчение сырьевой смеси будет приводить к повышенным энергозатратам. Поэтому оптимальными параметрами можно считать измельчение сырьевой смеси до фракции 0–0,16 мм и обжиг при температуре 1050 °С. Однако следует отметить, что для опок, как камневидного сырья, степень измельчения сырьевой смеси и температура обжига являются двумя взаимосвязанными факторами: можно снизить температуру обжига и увеличить степень измельчения и наоборот. В нашем случае, можно измельчать сырьевую смесь до фракции 0–0,08 мм и обжигать при температуре 1000 °С.

При данной плотности керамического черепка, его теплопроводность, за счет высокой микропористости и наличия в большом количестве аморфной составляющей в виде опалового кремнезема, по нашим расчетным данным и данным наших экспериментальных работ и работ других исследователей составляет 0,30–0,34 Вт/(м·°С) [15]. При данных показателях гарантирована возможность производства крупноформатных керамических блоков с пустотностью 50–55 %, теплопроводностью 0,09–0,12 Вт/(м·°С) и пределом прочности при сжатии 10–15 МПа. Данные показатели превосходят показатели блоков из автоклавного ячеистого бетона (газоблоков) и являются конкурентным преимуществом на рынке стеновых материалов для промышленного и гражданского строительства.

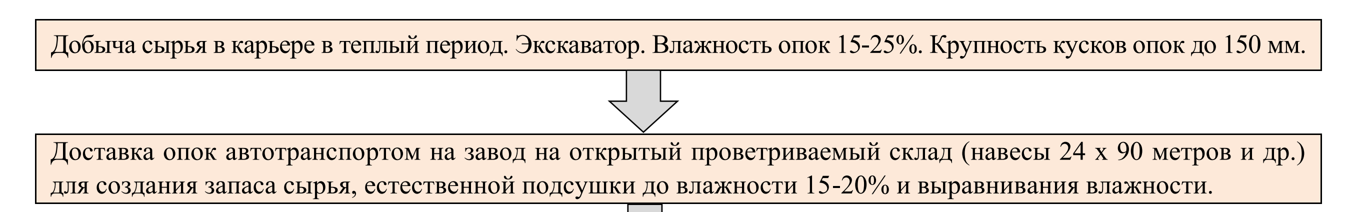
Полученные нами данные позволили разработать оптимальную технологическую схему, позволяющую выпускать изделия с минимальной себестоимостью. Основными принципами данной схемы являются следующие технологические решения:

– массоподготовка включает два основных вида оборудования;

– формование изделий осуществляется способом полужесткой экструзии с садкой изделий непосредственно на обжиговые вагонетки;

– в качестве топлива используются побочные продукты переработки террикоников в виде угольного кека с зольностью около 50 % и зерновым составом 0,5–2,0 мм.

На рис. 7 представлена технологическая схема производства с указанием основных операций и вида используемого оборудования без привязки к конкретной производительности предприятия, так как один и тот же вид оборудования может иметь различную производительность.



Измельчение опок на молотковой дробилке для камневидного сырья с системой и с определенным зазором между колосниками. На выходе порошок с зерновым составом преимуещественно фракции 0-0,16 мм с влажностью до 15% с последующим хранением в бункерах запасниках на 1 смену.

Увлажнение и усреднение сырья с вводом угольного кека. Трехвальный смеситель с системой увлажнения и вводом добавок с последующим хранением в бункерах- запасниках на 1 смену работы пресса-экструдера. Влажность формовочной массы для опоковидного сырья 20-30%.

Формование изделий на прессе экструдере, оснащенном смесителем, системой доувлажнения и вакуумирования массы (при необходимости) и давлением в головке прессе 2-3 МПа. Садка изделий на обжиговые вагонетки.

Подсушка изделий на обжиговых вагонетках в естественных условиях на обводных путях участка сушки и обжига в течение 24 часов. Сушка изделий на обжиговых вагонетках в туннельной сушилке в течение 24 часов.

Обжиг изделий в туннельной печи на обжиговых вагонетках на ложковой поверхности при температурах обжига 1000-1050 ºС. Время обжига 24 часа с последующей укладкой изделий на поддоны.

Рис. 7. Технологическая схема производства керамических камней на основе опок и угольного кека

Учитывая высокую трещиноватость опоковидных пород, их разработка в карьере может вестись обычными экскаваторами традиционным способом без буровзрывных работ. Ожидаемая крупность кусков по опыту существующих карьеров будет составлять не более 150 мм. После добычи опоки автотранспортом доставляются на склад сырья, представляющий собой открытые со всех сторон заасфальтированные площадки под навесами различных размеров.

Под одним таким навесом с размерами 24 на 90 метров и высотой 6 метров при высоте бурта 4–5 метров может храниться 8–10 тысяч кубов сырья. Четыре таких навеса вполне могут обеспечить запас сырья на год для завода производительностью 30 млн. штук в год в пересчете на условный кирпич. Хранение под навесами обеспечивает подсушку сырья, что существенно ускоряет его переработку и снижает энергозатраты. Кроме того, в зависимости от погодных условий, погрузчик может отбирать сырье с любой стороны, где оно более сухое.

Со склада сырья с помощью погрузчика опока поступает в приемный бункер, оснащенный питателем. Его размеры подбираются в зависимости от производительности завода. Он может располагаться под навесом, примыкающим к корпусу массоподготовки, и пыль не будет попадать в цех массоподготовки. Далее по системе конвейеров сырье попадает для измельчения на специальную молотковую дробилку для камневидного глинистого сырья, оснащенную системой подогрева отбойника и разработанную специально для малопрочных пород, обладающих малой пластичностью. При определенных настройках такая дробилка на выходе выдает зерновой состав менее 1 мм с преимущественным содержанием тонких фракций менее 50 мкм. В данной дробилке совмещены ударный, раздавливающий и истирающий принципы измельчения, для получения порошка с тонким зерновым составом (рис. 8). Зерновой состав порошка может изменяться в зависимости от настройки данного оборудования. Проводимые нами эксперименты в заводских условиях позволили получить необходимый зерновой состав порошка, представленный в таблице 2, после однократного измельчения.

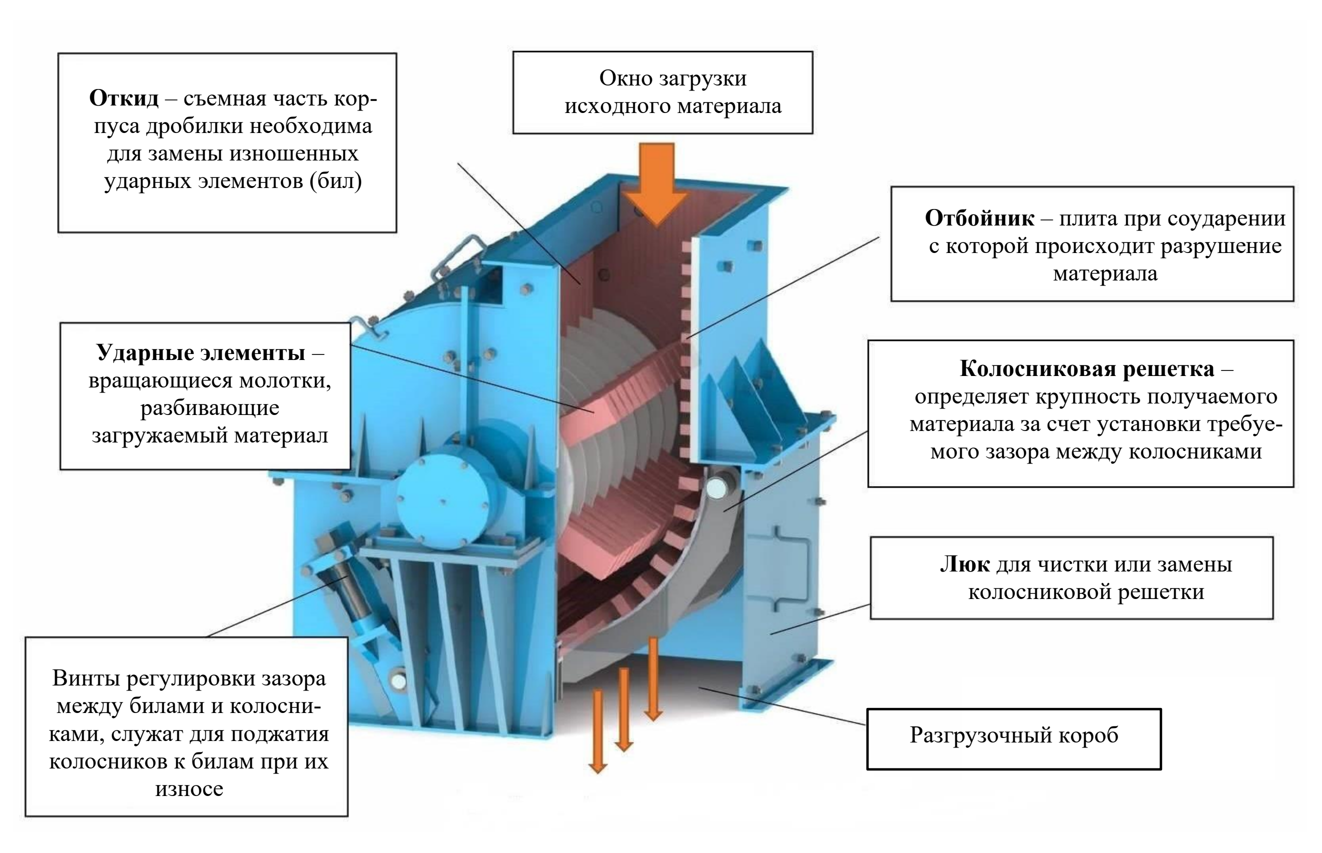


Рис. 8. Молотковая дробилка в открытом виде для камневидного опоковидного сырья

После измельчения порошок по системе шнековых транспортеров подается в бункер-запасник объемом, достаточным для 1 смены работы линии формования. Для завода производительностью 30 млн. штук условного кирпича в год объем бункера-запасника составляет около 100 м^3. Сменный запас измельченного сырья позволяет проводить профилактические работы участка массоподготовки без остановки последующих технологических переделов.

Таблица 2

Зерновой состав измельченных опок после однократного измельчения

Фракция, мм						
Более 1,25	0,63–1,25	0,315–0,63	0,16–0,315	0,08–0,16	0,05–0,05	Менее 0,05
1,23	5,62	6,43	16,14	13,58	5,92	51,08

После бункера-запасника порошок по системе конвейров попадает в трехвальный смеситель, в котором производится ввод угольного кека от отдельного питателя, увлажение массы до формовочной влажности (для опок это 25–30 %) и тщательное перемешивание. После смесителя формовочная масса попадает в бункер-накопитель объемом, достаточным для 1 смены работы формующего пресса. Сменный запас формовочной массы позволяет проводить профилактические работы участка массоподготовки без остановки последующих технологических переделов.

Подготовленная шихта подается на вакуум-пресс, состоящий из 2-х частей: смеситель, в который поступает формовочная масса, вакуумная камера с водокольцевым насосом и, собственно, экструдер. Смеситель производит окончательное усреднение шихты и ее доувлажнение при необходимости. Далее усредненная и увлажненная масса подается в экструдер, где при давлении в головке пресса 2–3 МПа формуется брус, который автоматическим резаком разрезается на отдельные изделия, которые, в свою очередь, группируются в комплекты и роботом-садчиком укладываются на обжиговые вагонетки в ряды, высотой 1,1 метра (пять изделий с толщиной 219 мм).

Учитывая малую чувствительность опок к сушке, подсушка изделий производится сначала на обжиговых вагонетках в естественных условиях на обводных путях участка сушки и обжига в течение 24 часов, а затем в туннельной сушилке в течение 24 часов**.**

Учитывая высокую пустотность изделий и высокую газопроницаемость сырьевых смесей на основе опок, обжиг производится по ускоренному режиму в туннельной печи с автоматической регулировкой газовой среды и температуры в течение 24 часов. Постоянный тепловой поток пересекает туннель по всей длине в направлении, противоположном перемещению изделий. Это обеспечивает теплообмен от выхода к входу вагонеток через зоны подогрева, обжига и охлаждения.

В зоне подогрева горячие газы от сгорания угля, циркулирующие через изделия, нагревают их, при этом сами охлаждаются перед удалением в дымовую трубу (при 150 °C происходит досушка изделий). При температуре около 600–700 °C происходит самовозгорание угля и начинается обжиг изделий. При максимальной температуре осуществляется выдержка в течение трех часов. Это необходимо для получения равномерной температуры в пакетах керамических камней (максимальная температура выдержки — 1050 °C). В зоне охлаждения поток воздуха из окружающей среды всасывается со стороны выхода печи, проходит через изделия, охлаждая их, и сам при этом нагревается. Изделия охлаждаются до 100 °C при выходе из печи.

Из печи транспортером вагонетка с изделиями подается на рабочий путь, по которому посредством тягового механизма перемещается на разгрузку. Вагонетка с обожженными изделиями подается к порталу, поворотная головка которого послойно разгружает керамоблок и укладывает его на транспортер, где производится укладка на поддоны. Поддон обвязывается полиэтиленовой лентой посредством упаковочной машины. После чего изделия на поддонах электропогрузчиком с вилочным захватом перемещаются на склад готовой продукции.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования подтвердили дообжиговые технологические свойства опок и их отличия от традиционного размокаемого в воде глинистого сырья: повышенная формовочная влажность, небольшая воздушная усадка, малая чувствительность к сушке. Установлены зависимости плотности и прочности образцов от степени измельчения опок, температуры обжига и количества угольного кека в составе сырьевой смеси. Определено влияние отходов углеобогащения и их оптимальное количество на физико-механические свойства обожженных образцов. Ввод угольного кека с содержанием угля 50 % в количестве 15–20 % позволяет исключить использование газа для обжига или использовать его в минимальном объеме на реконструируемых заводах. На основе полученных результатов разработана упрощенная технологическая схема производства крупноформатных камней с их минимальной себестоимостью. Предлагаемая технологическая схема состоит из двух единиц основного массоподготовительного оборудования — молотковой дробилки и трехвального смесителя, формование изделий осуществляется способом полужесткой экструзии, сушка изделий производится непосредственно на обжиговых вагонетках, а для обжига по ускоренному режиму с минимальным расходом газа используется угольный кек, который вводится в состав сырьевой смеси. Предложенные составы масс на основе

опок и угольного кека и технологические решения позволят получать керамические блоки с низкой теплопроводностью — 0,09–0,12 Вт/(м·°С), средней плотностью 650–800 кг/м^3, при этом прочность при сжатии составит 10–15 МПа. Произведенные расчеты показали, что себестоимость крупноформатных керамических камней на основе опок с применением угольного кека будет составлять 3000–3500 рублей за кубометр изделий, что позволит керамическим камням конкурировать с газоблоками не только в техническом плане, но и в экономическом.

Ростовская область, обладающая огромными запасами опоковидных пород и большими невостребованными запасами техногенного угольного сырья, может стать центром производства высококачественных крупноформатных керамических камней с низкой стоимостью и обеспечить юг и центральную часть страны высококачественными стеновыми материалами.

Список литературы

1. Салахов А.М. Керамика для строителей и архитекторов. Казань: Парадигма; 2009. 296 с.

2. Божко Ю.А., Котляр В.Д., Рогочая М.В. Сравнительная эффективность применения в строительстве стеновых изделий плотностью менее 800 кг/м^3. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия.* 2015;(4):46–51. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-effektivnost-primeneniya-v-stroitelstve-stenovyh-izdeliy-plotnostyu-menee-800-kg-m3 (дата обращения: 01.07.2023).

3. Рубцов О.И., Боброва Е.Ю., Жуков А.Д., Зиновьева Е.А. Керамический кирпич, камни и полнокирпичные стены. *Строительные материалы.* 2019;(9):8–13. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13

4. *Анализ рынка керамического поризованного камня (кирпича, блоков) в России:* Аналитический отчет DISCOVERY RESEARCH GROUP. Москва: Агентство маркетинговых исследований Discovery research group. 2022. 44 с.

5. Трушин Г. Дом из керамоблоков: плюсы и минусы строительства. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.* 2023;3:33−35.

6. Малиновская М.И. Оценка эффективности применения строительных материалов для наружных ограждающих стеновых конструкций. *Тенденции развития науки и образования*. 2022;(92-15):53−55. https://doi.org/10.18411/trnio-12-2022-692

7. Семенов А.А. Итоги развития российского рынка стеновых материалов в 2021 г. *Строительные материалы.* 2022;(3):44–45. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-44-45

8. Котляр В.Д., Терехина Ю.В. Минералого-химические и структурные особенности опоковидных опал-кристобалитовых пород как сырья для стройиндустрии. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2023;334(1):145−155. https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/3852

9. Котляр В.Д., Терехина Ю.В. Классификационные признаки и особенности опал-кристобалитовых опоковидных пород как сырья для стеновой керамики. *Строительные материалы.* 2022;(4):25–30. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-25-30

10. Талпа Б.В. Перспективы развития минерально-сырьевой базы для производства светложгущейся стеновой керамики на Юге России. *Строительные материалы.* 2014;(4):20–23. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-mineralno-syrievoy-bazy-dlya-proizvodstva-svetlozhguscheysya-stenovoy-keramiki-na-yuge-rossii (дата обращения: 05.07.2023).

11. Aïtcin P.C. Supplementary Cementitious Materials and Blended Cements. *Science and Technology of Concrete Admixtures.* 2016:53–73. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00004-7

12. Fröhlich F. The Opal-CT Nanostructure. *Journal of Non-Crystalline Solids.* 2020;533:119938. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119938

13. Fomina O.A., Stoboushkin A.Y. Modeling of the Transition Layer in Ceramic Matrix Composites from Coal Wastes and Clay. *Solid State Phenomena.* 2020;299:37–42. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.37

14. Gaishun E., Yavruyan K., Kotlyar V., Lotoshnikova E. Raw Materials in East Donbass Based on Waste Piles Processing Screenings for the Large-sized Ceramic Stones' Production. *Materials Science Forum.* 2020;1011:116–122. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1011.116

15. Пастушков П.П., Павленко Н.В., Смирнов С.И. Исследования влияния различных факторов на теплопроводность крупноформатных керамических камней. *Строительные материалы.* 2023;(5):53–57. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-53-57

References

1. Salakhov AM. *Ceramics for Builders and Architects.* Kazan: Paradigma; 2009. 296 p. (In Russ.).

2. Bozhko UA, Kotlyar VD, Rogochaya MV. Comparative Efficiency of Application in the Construction of Wall Products with Density Less Than 800 kg/m^3. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region.*

2015;(4):46–51. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-effektivnost-primeneniya-v-stroitelstve-stenovyh-izdeliy-plotnostyu-menee-800-kg-m3 (accessed: 02.07.2023).

3. Rubtsov OI, Bobrova EYu, Zhukov AD, Zinov'eva EA. Ceramic Brick, Stones and the Full Brick Walls. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*. 2019;(9):8–13. (In Russ.). https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13

4. *Analysis of the Russian Market of Ceramic Porous Stone (Bricks, Blocks): Analytical Report DISCOVERY RESEARCH GROUP*. Moscow: Marketing Research Agency DISCOVERY RESEARCH GROUP; 2022. 44 p.

5. Trushin G. House of Ceramic Blocks: Pros and Cons of Construction. *Stroitel'nye Materialy, Oborudovanie, Tekhnologii XXI Veka*. 2023;3:33−35. (In Russ.).

6. Malinovskaya MI. Evaluation of Efficiency of Construction Materials Application for External Enclosing Wall Structures. *Tendencii Razvitiya Nauki i Obrazovaniya*. 2022;(92-15):53−55. (In Russ.). https://doi.org/10.18411/trnio-12-2022-692

7. Semenov AA. Results of the Development of the Russian Wall Materials Market in 2021. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*. 2022;(3):44–45. (In Russ.). https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-800-3-44-45

8. Kotlyar VD, Terekhina YuV. Mineral-chemical and Structural Features of Opokamorphic Opal-Cristobalite Rocks as Raw Material for the Construction Industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023;334(1):145−155. (In Russ.). https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/3852

9. Kotlyar VD, Terekhina YV. Classification Features and Peculiarities of Opal-Cristobalite Opoka-Like Rocks as Raw Materials for Wall Ceramics. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*. 2022;(4):25–30. (In Russ.). https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-25-30

10. Talpa BV. Prospects of Development of Mineral-Raw Material Base for Manufacture of Wall Ceramics Becoming Light Color after Burning in the South of Russia. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*. 2014;(4):20–23. (In Russ.). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-mineralno-syrievoy-bazy-dlya-proizvodstva-svetlozhguscheysya-stenovoy-keramiki-na-yuge-rossii (accessed: 05.07.2023).

11. Aïtcin PC. Supplementary Cementitious Materials and Blended Cements. *Science and Technology of Concrete Admixtures*. 2016:53–73. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00004-7

12. Fröhlich F. The Opal-CT Nanostructure. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2020;533:119938. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119938

13. Fomina OA, Stoboushkin AY. Modeling of the Transition Layer in Ceramic Matrix Composites from Coal Wastes and Clay. *Solid State Phenomena*. 2020;299:37–42. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.37

14. Gaishun E, Yavruyan K, Kotlyar V, Lotoshnikova E. Raw Materials in East Donbass Based on Waste Piles Processing Screenings for the Large-sized Ceramic Stones' Production. *Materials Science Forum*. 2020;1011:116–122. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1011.116

15. Pastushkov PP, Pavlenko NV, Smirnov SI. Research of the Influence of Various Factors on the Thermal Conductivity of Large-Format Vertically Perforated Clay Blocks. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*. 2023;(5):53–57. (In Russ.). https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-53-57

Поступила в редакцию 20.08.2023
Поступила после рецензирования 03.09.2023
Принята к публикации 16.09.2023

Об авторах:

Котляр Владимир Дмитриевич, заведующий кафедрой «Строительные материалы» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: AAG-9437-2021, ScopusID, ORCID, diatomit_kvd@mail.ru

Терёхина Юлия Викторовна, старший преподаватель кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID: AAG-9447-2021, ScopusID, ORCID, yuliya-2209@mail.ru

Лапунова Кира Алексеевна, доцент кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ScopusID, ORCID, keramik_kira@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Котляр В.Д. — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, формулировка выводов по исследованиям.

Терёхина Ю.В. — детальное планирование, организация и реализация исследований, обработка и анализ результатов исследований, подготовка текста.

Лапунова К.А. — анализ результатов исследований, доработка текста, графическое оформление результатов исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 20.08.2023
Revised 03.09.2023
Accepted 16.09.2023

About the Authors:

Vladimir D. Kotlyar, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Building Materials Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID: AAG-9437-2021, ScopusID, ORCID, diatomit_kvd@mail.ru

Yuliya V. Terekhina, Senior Lecturer of the Building Materials Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID: AAG-9447-2021, ScopusID, ORCID, yuliya-2209@mail.ru

Kira A. Lapunova, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Building Materials Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, keramik_kira@mail.ru

Claimed contributorship:

Kotlyar VD — formalating of the main concept, aims and objectives of the study, formulating the conclusions of the research.

Terekhina YV — detailed planning, organisation and implementation of research, processing and analysis of research results, preparation of text.

Lapunova KA — analysis of research results, text revision, graphical design of research results.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.